



<https://doi.org/10.22067/ijpr.2026.99327.1139>

Responses of Physiological Traits of Mung Bean (*Vigna radiata* L.) to Paclobutrazol Foliar Application under Drought Stress

Behrooz Omid¹, Nosratollah Abbasi^{1*}, Fereshteh Darabi¹

Received: 14 June 2026

Revised: 27 July 2026

Accepted: 07 August 2026

Available Online: 07 August 2026

Cite this article:

Omid, B., Abbasi, N., & Darabi, F. (2026). Responses of physiological traits of mung bean (*Vigna radiata* L.) to paclobutrazol foliar application under drought stress. *Iranian Journal of Pulses Research*, 17(1), 177-196. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/ijpr.2026.99327.1139>

Introduction

Drought stress is one of the most important abiotic factors limiting agricultural production in arid and semi-arid regions of the world. Water deficit disrupts physiological and metabolic processes in plants, leading to reduced growth, impaired photosynthesis, and decreased grain yield. Drought stress also increases the production of reactive oxygen species (ROS), damages cellular membranes, decreases photosynthetic pigments, and ultimately reduces plant productivity. Mung bean (*Vigna radiata* L.) is an important legume crop because of its high nutritional value, short growth period, and nitrogen-fixing ability. However, this crop is highly sensitive to drought stress, particularly during flowering and grain filling stages. Therefore, improving drought tolerance in mung bean is essential under water-limited conditions. The application of plant growth regulators such as paclobutrazol has been considered an effective strategy for alleviating drought-induced damage. Paclobutrazol can improve drought tolerance by enhancing plant water status, maintaining membrane stability, promoting osmotic adjustment, and strengthening antioxidant defense systems. Previous studies have also shown that triazole compounds modulate stress-responsive pathways and improve plant performance under water-deficit conditions. However, these responses may vary with cultivar and drought intensity, and the underlying physiological mechanisms remain insufficiently understood. Therefore, the present study aimed to evaluate the physiological and biochemical responses of two mung bean cultivars to paclobutrazol application under drought stress.

Materials and Methods

This experiment was conducted during the 2024–2025 crop year at the Research Farm of the Faculty of Agriculture, University of Ilam, Iran. The experiment was arranged as a split-plot factorial based on a randomized complete block design with three replications. Experimental treatments consisted of three drought stress levels (40, 80 and 120 mm evaporation from Class A evaporation pan) as the main factor and three levels of paclobutrazol foliar application (0, 30, and 80 mg.L⁻¹) along with two mung bean cultivars (Partow and Gohar) as subplot treatments. Drought stress treatments were imposed after complete seedling establishment based on cumulative evaporation from the Class A evaporation pan. Paclobutrazol was sprayed three times at 72-hour intervals. Physiological and biochemical traits including relative water content, ion leakage, chlorophyll a and b, carotenoids, proline, soluble sugars, catalase activity, and ascorbate peroxidase activity were measured at the flowering stage, while grain yield was determined at maturity. Statistical analyses were performed using SAS software (Ver. 9.1), and mean comparisons were conducted using the Least Significant Difference (LSD) test at the 5% probability level.

Results and Discussion

The results indicated that increasing drought stress significantly reduced relative water content, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid content, and grain yield in both mung bean cultivars. In contrast, ion leakage, proline accumulation, soluble sugars, and antioxidant enzyme activities increased under drought stress conditions. Paclobutrazol application improved physiological and biochemical characteristics in both cultivars, and the greatest positive effects were observed at 80 mg.L⁻¹. Foliar application of paclobutrazol increased relative water content, photosynthetic pigments, proline, soluble sugars, and the activities of catalase and ascorbate peroxidase enzymes, while reducing ion leakage under drought stress conditions. The interaction effects of drought stress, paclobutrazol, and cultivar demonstrated that cultivar Gohar showed superior performance under mild and moderate drought stress conditions in terms of most physiological traits and grain

1- Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

* Corresponding Author: n.abbasi@ilam.ac.ir



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

yield. In contrast, cultivar Partow exhibited greater tolerance under severe drought stress conditions through better maintenance of physiological characteristics and stronger antioxidant defense responses. Enhanced antioxidant enzyme activities and increased accumulation of osmotic adjustment compounds in paclobutrazol-treated plants played an important role in reducing drought-induced oxidative damage, maintaining membrane stability, and improving drought tolerance.

Conclusions

Overall, drought stress adversely affected physiological traits and grain yield of mung bean plants. However, paclobutrazol application considerably alleviated the negative effects of drought stress. Foliar application of paclobutrazol, particularly at 80 mg L⁻¹, improved plant water status, enhanced antioxidant defense systems, increased osmotic adjustment compounds, and maintained membrane stability, resulting in greater drought tolerance in mung bean plants. In general, cultivar Gohar showed better overall performance in terms of physiological traits and grain yield, whereas cultivar Partow exhibited greater tolerance under severe drought stress conditions.

Acknowledgement

The authors would like to express their sincere gratitude to the University of Ilam and the Agricultural and Natural Resources Research Station of Sarableh for providing the facilities required for conducting this research.

Keywords: Catalase, Grain yield, Photosynthetic pigments, Proline, Soluble sugars



پاسخ صفات فیزیولوژیکی ماش (*Vigna radiata* L.) به محلول پاشی پاکلوبوترازول تحت تأثیر تنش خشکی

بهروز امیدی^۱، نصرت اله عباسی^{۱*}، فرشته دارابی^۱..

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۶

چکیده

به منظور بررسی پاسخ صفات فیزیولوژیکی ماش (*Vigna radiata* L.) به محلول پاشی پاکلوبوترازول تحت تأثیر تنش خشکی، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام اجرا شد. تیمارها شامل سه سطح تنش خشکی (۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر)، سه سطح محلول پاشی پاکلوبوترازول (۰، ۳۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر) و دو رقم ماش (پرتو و گوهر) بودند. نتایج این پژوهش نشان داد که در هر دو رقم، محلول پاشی پاکلوبوترازول در همه سطوح تنش خشکی سبب بهبود صفات فیزیولوژیکی و تعدیل تنش خشکی در گیاه ماش شد، اما رقم پرتو تحت شرایط تنش شدید خشکی مقاومت بیشتری از خود نشان داد، در حالی که رقم گوهر در شرایط تنش خفیف تا متوسط از نظر اکثر صفات فیزیولوژیکی و عملکرد دانه برتری داشت. طبق نتایج به دست آمده محلول پاشی غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در رقم گوهر ۹/۹ درصد و در رقم پرتو ۱۰/۲۳ درصد محتوای نسبی آب برگ را افزایش داد. در تیمار ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر نسبت به تیمارهای ۸۰ و ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، در رقم پرتو، به ترتیب ۶ و ۱۰/۲ درصد و در رقم گوهر، به ترتیب ۵ و ۲۸/۲ درصد میزان کلروفیل b کاهش یافت. کاربرد محلول پاشی غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در شرایط ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، میزان کلروفیل a، پرولین، قندهای محلول، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در رقم پرتو به ترتیب ۲۵/۳، ۱۴/۲۹، ۵/۱۱ و ۳۰/۳ درصد و در رقم گوهر ۳۰/۷۵، ۱۹/۶۱، ۳۰/۷، ۳۰/۳ و ۱۶/۲ درصد افزایش یافت و در شرایط ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر نیز در رقم پرتو به ترتیب ۴/۱، ۵۹/۶، ۱۱/۴۷، ۳۸/۸ و ۱۴/۹ درصد و در رقم گوهر ۱۱/۸، ۵۴/۹، ۱۵/۴۵، ۴۲/۵ و ۴/۱ درصد افزایش یافت. بر این اساس، در سطح ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، استفاده از رقم گوهر همراه با محلول پاشی پاکلوبوترازول غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر و در سطح ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، استفاده از رقم پرتو همراه با محلول پاشی پاکلوبوترازول با غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر، به عنوان برترین تیمارهای این پژوهش، می‌تواند به عنوان یک گزینه مدیریتی مناسب برای افزایش تحمل گیاه ماش به محدودیت آب مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پرولین، رنگیزه‌های فتوسنتزی، عملکرد دانه، قندهای محلول، کاتالاز

مقدمه

در مناطق دیم که میزان بارندگی کمتر از نیاز آبی گیاه باشد، رشد و تولید آن تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد (Heidari et al., 2019). اگرچه ماش در مقایسه با برخی از محصولات زراعی مقاومت بیشتری به کم‌آبی دارد، اما مراحل گل‌دهی و پُر شدن دانه از حساس‌ترین مراحل رشد آن محسوب می‌شوند و کمبود آب در این دوره‌ها می‌تواند موجب کاهش شاخص‌های رشدی و عملکردی گیاه شود (Babarashi et al., 2021).

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل غیرزیستی محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در جهان به شمار می‌رود و با تشدید تغییرات اقلیمی، شدت و فراوانی آن به‌طور مداوم در حال افزایش است (Khan et al., 2025). این تنش با کاهش دسترسی گیاه به آب، فرآیندهای فیزیولوژیکی کلیدی را مختل می‌کند و منجر به

ماش (*Vigna radiata* L.) یکی از لگوم‌های دانه‌ریز و حبوبات باارزش محسوب می‌شود که به دلیل دارا بودن ترکیبات تغذیه‌ای مطلوب شامل ۲۲-۲۵ درصد پروتئین، حدود ۵۱ درصد کربوهیدرات، چهار درصد مواد معدنی (منیزیم، پتاسیم، منگنز، مس و روی)، ویتامین‌های گروه B، فیبر و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، از اهمیت ویژه‌ای در تغذیه انسان برخوردار است (Ahmadi et al., 2019). علاوه بر ارزش غذایی، ویژگی‌هایی مانند دوره رشد کوتاه و توانایی تثبیت زیستی نیتروژن موجب شده است که این گیاه به عنوان یکی از محصولات مهم در نظام‌های کشاورزی پایدار مورد توجه قرار گیرد (Babarashi et al., 2021). ماش به دلیل سازگاری نسبی با شرایط کم‌آبی، تا حدودی توانایی تحمل محدودیت آب را داراست. با این حال،

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

(*)- نویسنده مسئول: n.abbasi@ilam.ac.ir

درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد شد. این افزایش عملکرد می‌تواند به بهبود تعادل بین رشد رویشی و زایشی، افزایش تخصیص مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی و کارایی بیشتر انتقال آسمیلات‌ها به دانه‌ها نسبت داده شود (Panda et al., 2023). این پژوهش با هدف بررسی نقش پاکلوبوترازول در بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه ماش به تنش خشکی و بررسی اثر آن به عنوان یک ترکیب تنظیم‌کننده رشد در افزایش تحمل گیاه به شرایط کم‌آبی انجام شد. شناخت سازوکارهای فیزیولوژیکی مؤثر در افزایش تحمل به خشکی می‌تواند زمینه را برای به کارگیری مؤثر این ترکیب در مدیریت تنش و بهبود سازگاری گیاه ماش با شرایط کم‌آبی فراهم سازد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام، با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی و با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۱۷۴ متر از سطح دریا اجرا شد. میانگین بلندمدت بارندگی و دمای سالانه در منطقه به ترتیب ۶۰۰ میلی‌متر و ۲۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تیمارهای آزمایش شامل تنش خشکی در سه سطح ($D_1: 40$ ، $D_2: 80$ و $D_3: 120$ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) به عنوان عامل اصلی و محلول‌پاشی پاکلوبوترازول در سه سطح ($P_0: 0$ ، $P_1: 30$ و $P_2: 80$ میلی‌گرم در لیتر) (Soumya & Kumar, 2017) و رقم گیاه ماش در دو سطح (پرتو و گوهر) به صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. پیش از اجرای آزمایش و قبل از کشت، نمونه‌برداری خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری سطح خاک با استفاده از روش نمونه‌برداری مرکب انجام شد. بدین منظور، نمونه‌های خاک از چندین نقطه به صورت تصادفی در سطح مزرعه برداشت و پس از اختلاط کامل، یک نمونه مرکب نهایی برای اندازه‌گیری‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام منتقل گردید (Peterson & Calvin, 1996)، نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه شده است (جدول ۱). مشخصات آب‌وهوایی نیز در جدول ۲ نشان داده شده است (جدول ۲).

در این پژوهش براساس نتایج آزمون خاک، میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل در زمان کاشت به خاک اضافه شد. در تاریخ ۱۹ تیرماه، مطابق نقشه طرح آزمایشی، عملیات کاشت ارقام ماش به روش خشکه‌کاری انجام گردید. واحدهای آزمایشی در ابعاد ۳×۳ متر ایجاد شدند و در هر واحد آزمایشی شش ردیف کاشت به طول سه متر با فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر در نظر گرفته شد. فاصله بین کرت‌های مربوط به تیمارهای مختلف آبیاری دو متر و فاصله بین تکرارها ۲/۵ متر در نظر گرفته شد. فاصله بذور روی ردیف

کاهش شدید عملکرد محصول و تهدید امنیت غذایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود (Seleiman et al., 2021). تنش خشکی با ایجاد تنش اکسیداتیو، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز را تحت تأثیر قرار داده و موجب افزایش تجمع ترکیبات اسمزی از جمله پرولین و قندهای محلول به عنوان سازوکارهای دفاعی گیاه می‌شود. این تغییرات در نهلیت می‌تواند با اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی، کاهش رشد و عملکرد دانه گیاه را به همراه داشته باشد (Cao et al., 2024). این پاسخ‌ها در گیاهان مختلفی از جمله لوبیا (*Abd (Phaseolus vulgaris L.)*) (El-Gawad et al., 2021) و باقلا (*Eesha et al., 2024*) (*Vicia faba. L.*) (Abid et al., 2025) نیز گزارش شده است. تنش خشکی باعث کاهش قابل توجه محتوای کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ در ماش شد و ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی، سطوح بسیار بالاتری از اسمولیت‌ها از جمله پرولین را تجمع دادند که تنظیم اسمزی و پایداری سلولی را در شرایط کمبود آب افزایش می‌دهد (Alghabari, 2026). برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی، کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی راهکاری مؤثر، کم‌هزینه و سریع‌الاث‌ر محسوب می‌شود (Desta & Amare, 2021).

پاکلوبوترازول یک ترکیب شیمیایی از خانواده تریازول‌ها است که به عنوان مهارکننده انتخابی و قوی بیوسنتز جیبرلین عمل می‌کند، این ماده با اتصال رقابتی به آنزیم اکسیداز لنت-کائورن، مرحله اکسیداسیون انت-کائورن به انت-کائورنوئیک اسید را مسدود کرده و سطح جیبرلین‌های فعال را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (Desta & Amare, 2021). مطالعات متعددی کاربرد خارجی پاکلوبوترازول را در افزایش تحمل به تنش خشکی مؤثر دانسته‌اند. در گیاه ماش، کاربرد محلول‌پاشی پاکلوبوترازول تحت شرایط تنش کم‌آبی موجب افزایش ۳۹ و ۱۹ درصدی محتوای کلروفیل a و b شد، همچنین با افزایش ۲۰ درصدی پرولین به بهبود تحمل گیاه به تنش خشکی کمک کرد (Babarashi et al., 2021). در گیاه سویا (*Glycine max*)، کاربرد پاکلوبوترازول با غلظت ۴۰ میلی‌گرم در لیتر تحت شرایط تنش خشکی، با کاهش اثرات منفی تنش و بهبود پاسخ‌های دفاعی گیاه همراه شد؛ به طوری که این تیمار موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز (۱۴ درصد) و پراکسیداز (۴۲ درصد) و همچنین افزایش ترکیبات اسمزی شامل پرولین (۱۰ درصد) و قندهای محلول (شش درصد) شد. این تغییرات با بهبود تنظیم اسمزی، کاهش آسیب اکسیداتیو و افزایش تحمل گیاه سویا به تنش خشکی همراه بود (Sharifa & Abu-Muriefah, 2015). کاربرد پاکلوبوترازول با غلظت ۳۵ میلی‌لیتر در هکتار در گیاه نخود (*Cicer arietinum. L.*) موجب افزایش حدود ۳۰

تبخیر از تشتک تبخیر با جایگزینی اعداد در معادله ۱، میزان حجم آب مورد نیاز برای آبیاری محاسبه گردید (Bucks et al., 1982).
 که در آن، VW : حجم آب آبیاری (مترمکعب)، FC : درصد وزنی رطوبت خاک در حالت ظرفیت مزرعه، PWP : درصد وزنی رطوبت خاک در حالت پژمردگی دائم، BD : وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه (گرم بر سانتی مترمکعب)، A : مساحت کرت فرعی آزمایش (مترمربع)، D : عمق ریشه (متر)، MAD : حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (گرم بر سانتی مترمکعب) و Ea : راندمان آب آبیاری است.

جهت تعیین درصد وزنی رطوبت خاک در حالت ظرفیت مزرعه، یک روز قبل از اعمال تیمارهای آبیاری، خاک کرت‌های آزمایشی تا حد اشباع آبیاری شد. پس از خروج آب ثقی و رسیدن رطوبت خاک به حالت تعادل (حدود ۴۸ تا ۷۲ ساعت پس از آبیاری)، نمونه‌های خاک از عمق توسعه ریشه برداشت شد و نمونه‌ها پس از اندازه‌گیری وزن تر، در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت قرار داده شدند. سپس درصد وزنی رطوبت خاک با استفاده از روش وزنی و براساس اختلاف وزن تر و خشک نمونه نسبت به وزن خشک خاک با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد (Klute, 1986).

$$VW = \frac{(FC - PWP) \times BD \times A \times D \times MAD}{Ea} \quad \text{معادله (۱)}$$

$$FC = \frac{Wt - Wd}{Wd} \times 100 \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن، FC : ظرفیت زراعی خاک، Wt : وزن تر خاک و Wd : وزن خشک خاک است.

۱۰ سانتی‌متر و عمق کاشت بذرها سه سانتی‌متر تنظیم گردید. در هر نقطه از ردیف کاشت، تعداد سه بذر کشت شد. پس از سبز شدن و استقرار اولیه گیاهچه‌ها، عملیات تنک کردن انجام گردید تا تراکم مطلوب و یکنواخت بوته‌ها در هر واحد آزمایشی حفظ شود. تراکم کاشت برای هر دو رقم یکسان در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه دقیق پاسخ ارقام به تیمارهای آزمایشی و حذف اثر ناشی از تفاوت تراکم اولیه بوته‌ها فراهم گردد. بلافاصله پس از انجام عملیات کاشت، آبیاری انجام شد.

محلول پاشی برگ هورمون پاکلوبوترازول در سه نوبت به فاصله ۷۲ ساعت یک بار و نزدیک به یک هفته پس از آغاز تنش رطوبتی صورت گرفت. همچنین برای جلوگیری از تأثیر نامطلوب نور خورشید، محلول پاشی به هنگام غروب آفتاب انجام گرفت. محلول پاشی با استفاده از سم پاش پشتی دستی انجام شد، به گونه‌ای که تمامی بوته‌ها به‌طور یکنواخت به محلول آغشته گردید. آبیاری کرت‌های آزمایشی به‌روش جویچه‌ای انجام شد. ابتدا حجم آب مورد نیاز هر کرت براساس معادله‌های ارائه‌شده در زیر محاسبه گردید. به‌منظور اندازه‌گیری و اعمال دقیق حجم آب، یک کنتور حجمی در مسیر لوله اصلی انتقال آب نصب شد و برای هر کرت یک لوله فرعی مجزا مجهز به نازل مستقل در نظر گرفته شد. مقدار آب مورد نیاز هر کرت از طریق لوله فرعی مربوطه و براساس قرلئت کنتور حجمی اعمال گردید. بدین ترتیب، تیمارهای مختلف تنش خشکی به‌صورت مستقل اعمال شدند. برای اعمال تیمارهای آبیاری پس از استقرار گیاهچه‌های ماش با محاسبه ظرفیت زراعی مزرعه و نقطه پژمردگی دائم و میزان

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Soil physical and chemical properties of experimental area

بافت	آهن	روی	مس	منگنز	منیزیم	فسفر	پتاسیم	نیترژن	کربن آلی	شوری	اسیدیته
Texture	Fe	Zn	Cu	Mn	Mg	Available P	Available K	Total N	Organic Carbon	E.C	pH
						(mg.kg ⁻¹)			(%)	(dS.m ⁻¹)	
لومی رسی Clay loam	10	1.9	7.2	14	230	5.5	300	0.11	1.30	0.35	7.2

جدول ۲- میانگین شاخص‌های آب‌وهوایی در طول دوره رشد گیاه ماش طی سال ۱۴۰۳ در شهرستان ایلام

Table 2- Mean climatic parameters during the 2024 growing season of mung bean in Ilam province

ماه‌های سال	میزان بارش	حداقل رطوبت نسبی	حداکثر رطوبت نسبی	میانگین حداقل درجه حرارت	میانگین حداکثر درجه حرارت
Months	Rainfall	Minimum relative humidity (%)	Maximum relative humidity (%)	Mean minimum temperature (°C)	Mean maximum temperature (°C)
تیر July	0	13	30	21.5	37.1
مرداد August	0	13	31	21.8	38.1
شهریور September	0	13	35	19.7	35.6
مهر October	0	15	41	14.4	29.7

که در آن، ET: تبخیر و تعرق گیاه مرجع، KP: ضریب تشنگ تبخیر کلاس A، ETP: میزان تبخیر روزانه از تشنگ تبخیر، ETC0: تبخیر و تعرق محصول و KC: ضریب گیاهی ماش است. به‌منظور ارزیابی صفات فیزیولوژیکی، در مرحله آغاز گل‌دهی از هر واحد آزمایشی تعداد هفت بوته به‌صورت تصادفی انتخاب و از برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته و سالم آن‌ها نمونه‌برداری گردید. نمونه‌های برگ‌ی بلافاصله در نیتروژن مایع منجمد و سپس جهت انجام آزمون‌های آزمایشگاهی در یخچال با دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. اما برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ و نشیت یونی، از نمونه‌های برگ تازه بلافاصله پس از نمونه‌برداری استفاده گردید. در پایان فصل رشد و در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک در تاریخ ۱۷ مهرماه زمانی که بخش عمده‌ای از برگ‌ها زرد شده، غلاف‌های ماش تغییر رنگ داده و از سبز به زرد تا قهوه‌ای تیره رسیده بودند، بوته‌های موجود در سطح یک مترمربع از هر واحد آزمایشی برداشت شدند. پس از خشک شدن بوته‌های برداشت‌شده، عملیات خرم‌ن کوبی انجام و دانه‌ها از باقیای گیاهی جدا گردید. وزن دانه‌های حاصل از هر واحد آزمایشی با استفاده از ترازوی دقیق اندازه‌گیری و با توجه به سطح برداشت‌شده، عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. محاسبات آماری و تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (Ver 9.1) و مقایسه میانگین داده‌ها براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) مورد بررسی قرار گرفت.

محتوای نسبی آب برگ

برای تعیین محتوای نسبی آب برگ از روش دیازپرز (Diaz-Perez, 2006) استفاده شد. ابتدا سه عدد برگ جوان در موقعیت یکسان روی بوته از هر نمونه انتخاب و جدا گردید. بعد از جدا نمودن برگ از گیاه، بلافاصله نمونه‌ها در محیط آزمایشگاهی به‌وسیله ترازو (با دقت ۰/۰۰۱ گرم) توزین شدند (وزن تر) و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر (جهت آب‌گیری کامل) قرار گرفته و پس از خشک شدن آب سطحی توسط دستمال کاغذی مجدداً توزین گردیدند (وزن اشباع). پس از آن، برگ‌ها به مدت ۴۸ ساعت و در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در داخل آون قرار داده شدند. پس از این مدت، نمونه‌ها توزین تا وزن خشک به دست آید. محتوای نسبی آب برگ با استفاده از معادله ۷ محاسبه گردید.

$$RWC = \frac{WF - WD}{WT - WD} \times 100$$

معادله (۷)

که در آن، RWC: محتوای نسبی آب، FW: وزن تر، WD: وزن خشک و WT: وزن اشباع است.

نقطه پژمردگی دائم با استفاده از روش صفحات فشاری تعیین شد. بدین منظور، نمونه‌های خاک پس از اشباع کامل، روی صفحات سرامیکی دستگاه قرار داده شدند و تحت فشار ۱۵۰۰ کیلوپاسکال (۱۵ بار) تا رسیدن به تعادل رطوبتی نگهداری گردید. سپس نمونه‌ها از دستگاه خارج شده، در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند و رطوبت باقی‌مانده با این فشار به‌عنوان نقطه پژمردگی دائم محاسبه گردید (Richards, 1948). حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی براساس اختلاف بین رطوبت خاک در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم و با در نظر گرفتن درصد تخلیه مجاز آب قبل استفاده گیاه محاسبه شد (Allen et al., 1998).

در این پژوهش از استوانه‌های فلزی مخصوص برای تعیین وزن مخصوص ظاهری خاک استفاده شد. با استفاده از این استوانه‌های فلزی، از خاک مزرعه نمونه‌ای دست‌نخورده تهیه و به آزمایشگاه منتقل گردید. حجم استوانه‌های فلزی را با استفاده از سطح مقطع و ارتفاع استوانه به دست آورده، سپس استوانه حاوی نمونه خاک، همراه با درپوش‌ها، به محض ورود به آزمایشگاه توزین شدند. با استفاده از کاردک، مقداری از خاک درون استوانه را برداشته و در تین‌های مخصوص اندازه‌گیری درصد رطوبت ریخته و توزین گردید. تین‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون و تحت حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده و دوباره توزین گردید و با استفاده از معادله ۳ وزن مخصوص ظاهری محاسبه شد (Aria, 1997).

$$Pb = ms/V \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن، Pb: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)، ms: وزن خاک خشک موجود در استوانه (گرم) و Vt: حجم کل خاک معادل حجم استوانه نمونه‌برداری (سانتی‌مترمکعب) است.

همچنین برای تعیین دور آبیاری، میزان تبخیر روزانه از تشنگ تبخیر کلاس A اندازه‌گیری و ثبت شد. میزان تبخیر و تعرق گیاه براساس معادله‌های ارائه‌شده (۵ و ۶) محاسبه گردید و آبیاری زمانی انجام گرفت که میزان تبخیر تجمعی از تشنگ به‌مقدار مشخص‌شده برای هر تیمار رسید. بدین ترتیب، دور آبیاری براساس میزان تبخیر تجمعی از تشنگ و نیاز آبی گیاه با استفاده از معادله ۴ تعیین گردید (Allen et al., 1998).

معادله (۴)

$$\text{دور آبیاری} = \frac{(\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \times D \times MAD \times BD}{ETC0}$$

$$ETC0 = KC \times ET \quad \text{معادله (۵)}$$

$$ET0 = KP \times ETP \quad \text{معادله (۶)}$$

نشت یونی

اندازه‌گیری نشت یونی با استفاده از روش فلاينت (Flinet, 1966) انجام گردید. از هر بوته یک برگ در موقعیت یکسان جدا و سپس توسط پانچر از هر برگ دیسک‌هایی تهیه و بر روی کاغذ صافی واتمن جهت حذف الکترولیت‌هایی که به سطوح آن‌ها چسبیده است، قرار داده شد و سپس با آب مقطر شست‌وشو داده شدند. سپس نمونه‌ها داخل لوله‌های درب دار حاوی پنج میلی‌لیتر آب مقطر قرار داده شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری گردیدند. سپس هدایت الکتریکی اولیه (EC_1) محلول در تماس با نمونه‌ها توسط EC متر (مدل Jenway 4010) اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. جهت پاره شدن سلول‌ها و خروج محتویات آن‌ها به محلول، عمل یخ زدن و ذوب شدن چندین بار تکرار گردید. در نهایت، هدایت الکتریکی نهایی (EC_2) قرائت گردید. میزان نشت یونی با استفاده از معادله ۸ محاسبه گردید.

$$\text{معادله (۸)} \quad = \frac{EC_1}{EC_2} \times 100 = \text{نشت یونی}$$

رنگی‌های فتوسنتزی

سنجش محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها به روش لیچنتال و ولبورن (Lichtenthaler & Wellburn, 1983) اندازه‌گیری گردید. ۰/۱ گرم از برگ‌های تازه گیاه در هاون چینی حاوی ۱۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد سائیده شد و پس از صاف کردن، جذب آن با دستگاه اسپکتروفتومتر (ANALYTIK JENA AG مدل SPECORD-50 ساخت آلمان) در طول موج‌های ۶۴۶/۸، ۶۴۳/۲ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد. جهت تنظیم دستگاه از استون ۸۰ درصد به عنوان شاهد استفاده گردید. غلظت رنگی‌های گیاهی برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تازه با استفاده از معادله‌های ۹ تا ۱۱ محاسبه گردید.

$$\text{معادله (۹)} \quad \text{Chl. a} = (12.25A_{663.2} - 2.79A_{646.8})$$

$$\text{معادله (۱۰)} \quad \text{Chl. b} = (21.21A_{646.8} - 5.1A_{663.2})$$

$$\text{معادله (۱۱)}$$

$$\text{Car.} = [(1000A_{470} - 1.8 \text{ Chl. a} - 85.02 \text{ Chl. b})/198]$$

که در آن، Chl. a، Chl. b و Car. به ترتیب غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها می‌باشد.

پروکلین

مقدار پروکلین براساس روش بیتس و همکاران (Bates et al., 1973) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. بدین صورت که ۰/۲ گرم از بافت تازه برگ گیاه جدا و در ۱۰ میلی‌لیتر محلول سولفوسالیسیلیک اسید سه درصد سائیده و مخلوط یکنواختی آماده گردید. سپس عصاره حاصل

به مدت ۱۰ دقیقه در دور ۱۳۰۰۰ سانتریفیوژ گردید. پس از آن، از محلول رویی حاصل شده از هر نمونه برای اندازه‌گیری مقدار پروکلین استفاده شد. دو میلی‌لیتر از مایع رویی حاصل از سانتریفیوژ عصاره با دو میلی‌لیتر معرف نین هیدرین و دو میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال مخلوط گردید و به مدت یک ساعت در حمام بن‌ماری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. بعد از خارج‌سازی نمونه‌ها از حمام بن‌ماری، لوله‌های محتوی مخلوط در حمام آب سرد قرار گرفتند. سپس چهار میلی‌لیتر تولوئن به مخلوط اضافه و لوله‌ها به خوبی ورتکس شدند. سپس لوله‌ها به مدت ۱۵ الی ۲۰ دقیقه ثابت نگه داشته شدند تا دو لایه مجزا در آن‌ها تشکیل شود. از لایه رنگی فوقانی که حاوی تولوئن و پروکلین بود برای اندازه‌گیری غلظت پروکلین استفاده شد. جهت قرائت طیف جذب این ماده رنگی از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر استفاده و مقدار پروکلین در هر نمونه با استفاده از منحنی استاندارد محاسبه گردید.

کربوهیدرات‌های محلول برگ

برای محاسبه مقدار کربوهیدرات‌های محلول برگ از روش ایریگوین و همکاران (Irigoyen et al., 1992) استفاده گردید. در این روش، ابتدا ۰/۱ گرم برگ تازه وزن شده و در هاون چینی با پنج میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد پودر شد. بعد از آن، محلول رویی را در فالدون ریخته و باقی‌مانده برگی مجدداً با ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد سائیده شد. مایع حاصل شده به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره الکلی سرد شده توسط سمپلر برداشته و در لوله آزمایش ریخته و سه میلی‌لیتر آنترون تازه تهیه شده (۱۵۰ میلی‌گرم آنترون + ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۷۲ درصد) به آن اضافه گردید. لوله‌های آزمایش را به مدت ۱۰ دقیقه در بن‌ماری قرار داده تا ماده رنگی به دست آید. پس از سرد شدن نمونه‌ها، میزان جذب آن‌ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر سنجش شد. غلظت کربوهیدرات‌های محلول برحسب میلی‌گرم بر گرم بافت تازه‌ی برگ با استفاده از منحنی استاندارد محاسبه گردید.

کاتالاز

فعالیت آنزیم کاتالاز براساس روش دهیندسا و همکاران (Dhindsa et al., 1981) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر سنجش گردید. مخلوط واکنش شامل ۳۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۱۵ میلی‌مولار، ۲/۵ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH = ۷) و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. فعالیت آنزیم کاتالاز برحسب مقدار تجزیه شدن پراکسید هیدروژن در طول موج ۲۴۰ نانومتر و با استفاده

از ضریب خاموشی $39/4$ میلی‌مول بر سانتی‌متر در مدت دو دقیقه مورد محاسبه قرار گرفت.

آسکوربات پراکسیداز

مخلوط واکنش شامل بافر پتاسیم فسفات 50 میلی‌مولار ($PH=7$)، آسکوربات $0/5$ میلی‌مولار، H_2O_2 15 میلی‌مولار، EDTA $0/1$ میلی‌مولار و 100 میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. تغییرات جذب نوری مخلوط واکنش در دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج 290 نانومتر به مدت دو دقیقه، در برابر بلانک (ترکیب مذکور بدون عصاره آنزیمی) محاسبه شد. ضریب خاموشی برابر $2/6$ میکرومول بر سانتی‌متر برای اکسیداسیون در دو دقیقه گزارش شد (Nakano & Asada, 1987).

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تنش خشکی در سطح احتمال $p \leq 0/01$ و اثر برهم‌کنش دوگانه پاکلوبوترازول و رقم در سطح احتمال $p \leq 0/01$ تأثیر معنی‌داری بر محتوای نسبی آب برگ گیاه ماش داشتند (جدول ۲). تنش خشکی سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ شد، به‌طوری که در تیمار 120 میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر نسبت به تیمارهای 80 و 40 میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، به‌ترتیب $15/24$ و $33/5$ درصد محتوای نسبی آب برگ کاهش یافت (شکل ۱). مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش محلول‌پاشی پاکلوبوترازول و رقم نیز بیانگر این بود که در هر دو رقم ماش، محلول‌پاشی پاکلوبوترازول سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ شد و این افزایش در غلظت بیشتر محلول‌پاشی پاکلوبوترازول (80 میلی‌گرم در لیتر) و رقم گوهر بیشتر بود، به‌طوری که کاربرد غلظت 80 میلی‌گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم محلول‌پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در رقم گوهر $9/9$ درصد و در رقم پرتو، $10/23$ درصد محتوای نسبی آب برگ افزایش یافت (شکل ۲).

در این مطالعه، کاهش محتوای نسبی آب برگ تحت شرایط تنش خشکی، همراه با کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی مشاهده شد. به نظر می‌رسد که تخریب رنگیزه‌ها و کاهش ظرفیت فتوسنتزی (کاهش کلروفیل a و b) در اثر تنش، با اختلال در حفظ تعادل آب سلول، به کاهش وضعیت آبی برگ منجر شده است. همچنین محلول‌پاشی پاکلوبوترازول احتمالاً با حفظ بیشتر رنگیزه‌های فتوسنتزی و بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ و بهبود تحمل گیاه به تنش خشکی شد.

کاهش محتوای نسبی آب برگ تحت تنش خشکی ناشی از کاهش پتانسیل آب خاک و محدود شدن جذب آب توسط ریشه‌ها

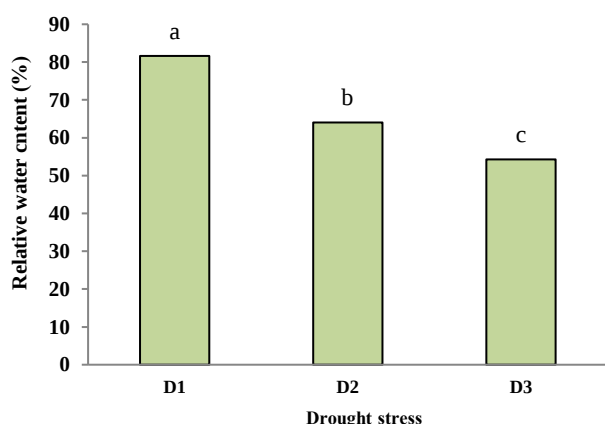
است که در نتیجه آن، تعادل بین جذب و از دست دادن آب در گیاه بر هم خورده و میزان آب موجود در بافت‌های برگ کاهش می‌یابد (Seleiman et al., 2021).

پاکلوبوترازول با افزایش سطح اسید آسبیزیک در برگ و القای بسته شدن روزنه‌ها، هدایت روزنه‌ای و میزان تعرق را کاهش داده و در نتیجه از کاهش آب بافت برگ جلوگیری می‌کند، همچنین کاهش سطح تعرقی برگ و ایجاد تغییرات ریخت‌شناختی و آناتومیکی در برگ، از جمله تغییر در ویژگی‌های روزنه‌ای، به حفظ آب سلولی و پایداری پتانسیل آب برگ کمک می‌کند، بنابراین گیاهان تیمار شده با پاکلوبوترازول توانایی بیشتری در حفظ وضعیت هیدراتاسیون برگ نشان می‌دهند (Bañón et al., 2023). این نتایج در گیاهان زراعی دیگری مانند گندم (*Triticum aestivum* L.) (Dwivedi et al., 2017) نیز گزارش شده است.

نشت یونی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که میزان نشت یونی گیاه ماش تحت تأثیر برهم‌کنش سه‌گانه تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم در سطح احتمال $P < 0/01$ معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در هر دو رقم ماش، میزان نشت یونی با افزایش سطوح خشکی، افزایش معنی‌دار یافت و با کاربرد محلول‌پاشی پاکلوبوترازول در همه شرایط رطوبتی اعمال‌شده، میزان نشت یونی کاهش یافت و این کاهش در رقم گوهر بیشتر بود به‌نحوی که کاربرد 80 میلی‌گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم محلول‌پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در رقم پرتو در شرایط 120 میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر $42/9$ درصد و در شرایط 40 میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر $23/54$ درصد و در رقم گوهر به‌ترتیب 27 و $13/97$ درصد نشت یونی کاهش یافت (شکل ۳).

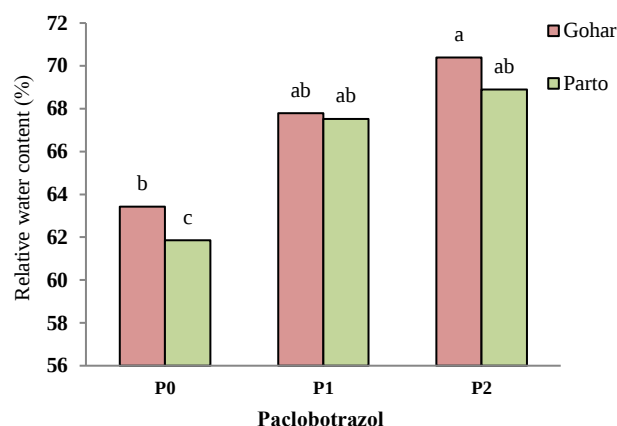
با توجه به نتایج این پژوهش، به نظر می‌رسد که کاهش محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش خشکی موجب کاهش پایداری غشای سلولی و در نتیجه افزایش نشت یونی شده است. از سوی دیگر، محلول‌پاشی پاکلوبوترازول با افزایش محتوای نسبی آب برگ و حفظ بهتر وضعیت آبی گیاه، توانسته است یکپارچگی غشاهای سلولی را حفظ کرده و از افزایش نفوذپذیری آن‌ها جلوگیری کند. در نتیجه، میزان نشت یونی در گیاهان تیمار شده با پاکلوبوترازول کاهش یافت. تنش خشکی با آسیب به غشای سلولی و افزایش پراکسیداسیون لیپیدها، نفوذپذیری غشاء را افزایش داده و موجب نشت یون‌ها و الکترولیت‌ها از سلول می‌شود (Vessal et al., 2020).



شکل ۱- اثر ساده تنش خشکی بر محتوای نسبی آب برگ گیاه ماش
Figure 1- Simple effect of drought stress on leaf relative water content in mung bean

D₁: ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D₂: ۸۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D₃: ۱۲۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر.

D₁: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D₂: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D₃: 120 mm evaporation from the evaporation pan

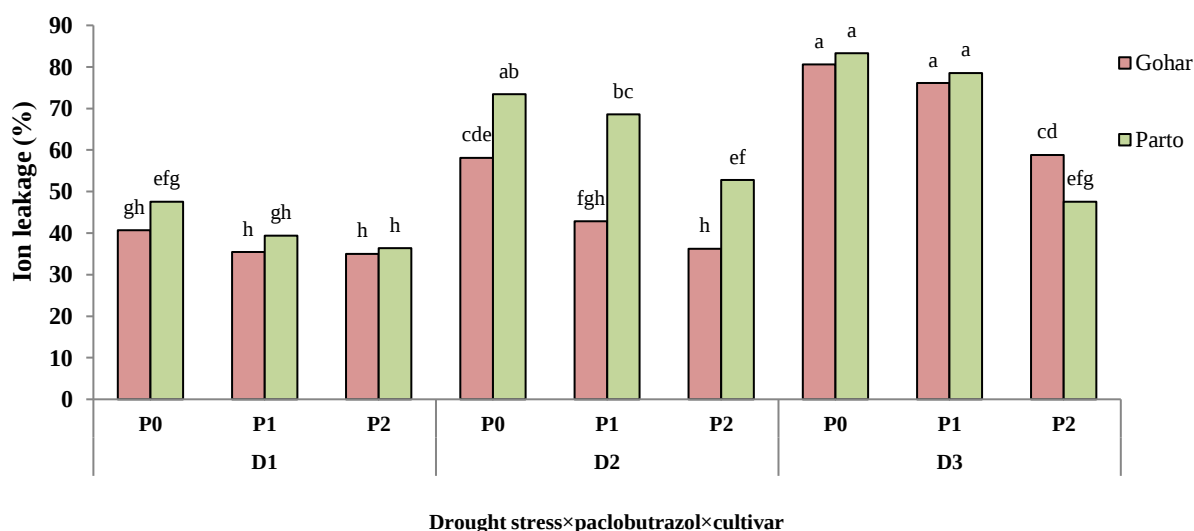


شکل ۲- اثر برهم کنش پاکلوبوترازول و رقم بر محتوای نسبی آب برگ گیاه ماش
Figure 2- Interaction effect of Paclobutrazol and cultivar on leaf relative water content in mung bean

P₀: عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول، P₁: غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر محلول پاشی

پاکلوبوترازول و P₂: غلظت ۸۰ میلی گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوبوترازول

P₀: no paclobutrazol foliar application, P₁: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P₂: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application



شکل ۳- اثر برهم کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم بر نشت یونی گیاه ماش

Figure 3- Interaction effect of drought stress, paclobutrazol, and cultivar on leaf relative water content in mung bean

D₁: ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D₂: ۸۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D₃: ۱۲۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، P₀: عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول، P₁: غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوبوترازول و P₂: غلظت ۸۰ میلی گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوبوترازول

D₁: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D₂: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D₃: 120 mm evaporation from the evaporation pan; P₀: no paclobutrazol foliar application, P₁: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P₂: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر سطوح مختلف تیمارهای تنش خشکی و پاکلوبوترازول بر صفات فیزیولوژیکی و عملکرد دانه ماش
Table 3- Analysis of variance (mean of squares) for the effects of different levels of drought stress and paclobutrazol treatments on physiological traits and grain yield of mung bean

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	نسبی آب برگ Relative water content	نشت یونی Ion leakage	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کاروتنوئید Carotenoid	پرولین Proline	قندهای محلول Soluble sugars	کاتالاز Catalase	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	عملکرد دانه Grain yield
بلوک Block	2	110.86 ^{ns}	137.88 ^{ns}	0.136 ^{ns}	0.506 ^{ns}	0.019 ^{ns}	110.3 ^{ns}	446.54 ^{ns}	0.000001 ^{ns}	0.0000008 ^{ns}	12810.41 ^{**}
تنش خشکی Drought stress	2	3457.17 ^{**}	3096.97 ^{**}	3.736 ^{**}	5.076 ^{**}	11.87 ^{**}	13671.35 ^{**}	31637.16 ^{**}	0.000074 ^{**}	0.0019 ^{**}	554809.95 ^{**}
خطای a Error a	4	7.21 ^{ns}	92.02 ^{ns}	0.269 ^{ns}	0.068 ^{ns}	0.054 ^{ns}	381.94 [*]	184.68 ^{ns}	0.00000014 ^{ns}	0.000035 ^{ns}	10748.51 ^{**}
پاکلوبوترازول Paclobutrazol	2	24.23 ^{ns}	2862.4 ^{**}	2.162 ^{**}	1.078 ^{ns}	0.074 ^{ns}	6485.23 ^{**}	22.19 ^{ns}	0.0000044 ^{**}	0.000096 ^{ns}	874.39 ^{ns}
رقم cultivar	1	0.033 ^{ns}	2.98 ^{ns}	0.804 ^{ns}	2.35 [*]	0.0019 ^{ns}	979.19 ^{**}	8296.83 ^{**}	0.000022 ^{**}	0.000028 ^{ns}	6755.42 ^{ns}
تنش خشکی × پاکلوبوترازول Drought stress × Paclobutrazol	4	55.74 ^{ns}	1377.95 ^{**}	1.418 [*]	1.394 ^{**}	0.079 ^{ns}	2477.89 ^{**}	10480.48 ^{**}	0.0000031 ^{**}	0.00084 ^{**}	18812.93 ^{**}
تنش خشکی × رقم Drought stress × cultivar	2	24.66 ^{ns}	132.38 ^{ns}	1.378 ^{ns}	2.704 ^{**}	0.095 ^{ns}	5948.1 ^{**}	989.88 ^{ns}	0.0000047 ^{**}	0.0013 ^{**}	12292.87 ^{**}
پاکلوبوترازول × رقم Paclobutrazol × cultivar	2	219.95 [*]	66.26 ^{ns}	4.307 ^{**}	2.78 ^{**}	0.106 ^{ns}	1299.86 ^{**}	6325.96 ^{**}	0.0000035 ^{**}	0.00085 ^{**}	9179.13 ^{**}
تنش خشکی × پاکلوبوترازول × رقم Drought stress × Paclobutrazol × cultivar	4	21.25 ^{ns}	183.07 ^{**}	1.952 ^{**}	1.013 ^{ns}	0.054 ^{ns}	3221.62 ^{**}	17945.11 ^{**}	0.0000022 ^{**}	0.0039 ^{**}	5983.25 [*]
خطای b Error b	30	68.64	43.47	0.483	0.399	0.046	97.87	342.21	0.0000003	0.0000046	1807.74
ضریب تغییرات (درصد) C.V (%)	-	12.43	10.43	8.88	11.47	6.68	15.67	6.27	8.15	18.3	4.25

ns, * و **: به ترتیب عدم معنی داری و معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد

ns: non-significant, * and **: significant at 5% and 1% level of probability, respectively

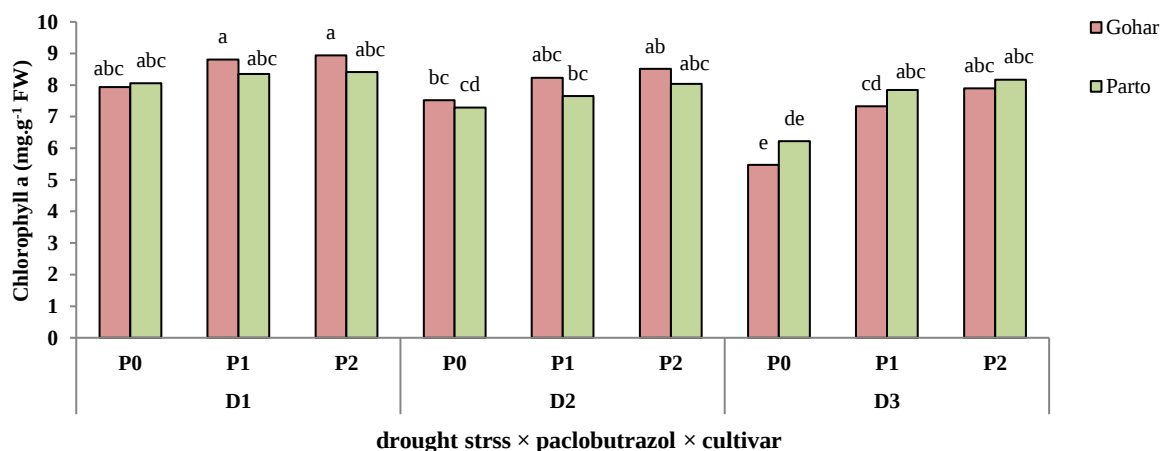
(2016). این اثر به بهبود پایداری غشاء و کاهش آسیب اکسیداتیو مرتبط است و در گیاهان زراعی مختلف نیز گزارش شده است، به طوری که در برنج تحت تنش کم آبی، کاهش نشت الکترولیت و بهبود شاخص پایداری غشاء مشاهده شده است (Maheshwari et al., 2024).

نتایج مشابهی در گیاهانی مانند نخود و ماش نیز گزارش شده است (Jothimani & Arulbalachandran, 2020). محلول پاشی پاکلوبوترازول با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها موجب حفظ یکپارچگی غشای سلولی و در نتیجه کاهش نشت یونی در شرایط تنش خشکی می‌شود (Pal et al.,

کلروفیل a

نشان داد که کاهش محتوای نسبی آب برگ و کلروفیل a تحت شرایط تنش خشکی با افزایش نشت یونی همراه بود. به نظر می‌رسد که کاهش وضعیت آبی گیاه موجب آسیب به غشاهای سلولی و افزایش نشت یونی شده و در نتیجه، ساختار کلروپلاست‌ها و رنگیزه‌های فتوسنتزی، به‌ویژه کلروفیل a نیز تحت تأثیر قرار گرفته است. در مقابل، کاربرد پاکلوپوترازول با افزایش محتوای نسبی آب برگ و کاهش نشت یونی، به حفظ کلروفیل a و بهبود عملکرد فتوسنتزی گیاه کمک کرد. کاهش کلروفیل a در شرایط تنش خشکی احتمالاً ناشی از فتواکسیداسیون کلروفیل، تخریب ساختار تیلاکوئیدها و افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل مانند کلروفیلاز در نتیجه تنش اکسیداتیو است (Shivalal et al., 2024). سوفی و همکاران (Sofy et al., 2020) در گیاه نخود فرنگی (*Pisum sativum* L.) گزارش دادند که محلول پاشی پاکلوپوترازول با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از تخریب تیلاکوئیدها جلوگیری کرده و محتوای کلروفیل a و b را حفظ می‌کند، در نتیجه ظرفیت فتوسنتزی گیاه بهبود می‌یابد.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها بیانگر این است که اثر برهم‌کنش سه‌گانه تنش خشکی، پاکلوپوترازول و رقم در سطح احتمال $P < 0.01$ بر میزان کلروفیل a در گیاه ماش تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۳). طبق مقایسه میانگین برهم‌کنش تنش خشکی، پاکلوپوترازول و رقم، در هر دو رقم پرتو و گوهر تنش خشکی سبب کاهش میزان کلروفیل a شد، اما محلول پاشی پاکلوپوترازول سبب افزایش میزان کلروفیل a گردید (شکل ۴). در شرایط ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم گوهر و در شرایط ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم پرتو میزان کلروفیل a بیشتری داشت. در محلول پاشی غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر پاکلوپوترازول نسبت به عدم محلول پاشی پاکلوپوترازول (شاهد) در رقم گوهر در شرایط ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر ۳۰/۷۵ درصد و در شرایط ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر ۱۱/۱۸ درصد و در رقم پرتو به ترتیب ۲۳/۸۶ و ۴/۱ درصد میزان کلروفیل a افزایش یافت (شکل ۴). نتایج حاضر



شکل ۴- اثر برهم‌کنش تنش خشکی، پاکلوپوترازول و رقم بر میزان کلروفیل a گیاه ماش

Figure 4- Interaction effect of drought stress, paclobutrazol, and cultivar on chlorophyll a content in mung bean

D₁: ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، D₂: ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، D₃: ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، P₀: عدم محلول پاشی پاکلوپوترازول، P₁: غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوپوترازول و P₂: غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوپوترازول

D₁: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D₂: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D₃: 120 mm evaporation from the evaporation pan; P₀: no paclobutrazol foliar application, P₁: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P₂: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application

و رقم نشان داد که در هر دو رقم پرتو و گوهر، تنش خشکی سبب کاهش میزان کلروفیل b شد. در شرایط ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم گوهر و در شرایط ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم پرتو، میزان کلروفیل b بیشتری داشت. به‌نحوی که در تیمار ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر نسبت به تیمارهای ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر در رقم پرتو ۶ و ۱۰/۲ درصد و در

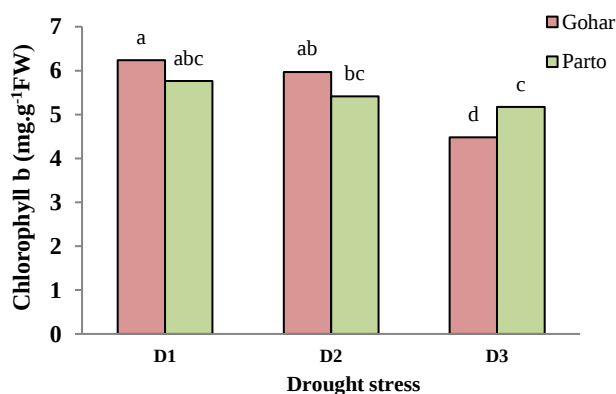
کلروفیل b

در این پژوهش، اثر برهم‌کنش دوگانه تنش خشکی و رقم در سطح احتمال $P < 0.01$ و اثر برهم‌کنش دوگانه پاکلوپوترازول و رقم در سطح احتمال $P < 0.01$ و برهم‌کنش تنش خشکی و پاکلوپوترازول در سطح احتمال $P < 0.01$ تأثیر معنی‌داری بر میزان کلروفیل b گیاه ماش داشتند (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش تنش خشکی

نسبت داده می‌شود که پایداری غشاء و کلروپلاست را در شرایط کم‌آبی تقویت می‌کند (Desta & Amare, 2021).

کاروتنوئید

طبق جدول تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده تنش خشکی در سطح احتمال $P < 0.01$ تأثیر معنی‌داری بر میزان کاروتنوئید گیاه ماش داشت و سایر عوامل آزمایشی تأثیر معنی‌داری نداشتند (جدول ۳). تنش خشکی سبب کاهش میزان کاروتنوئید شد، به نحوی که در تیمار ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر نسبت به تیمارهای ۸۰ و ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر ۲۱/۳۲ و ۵۱/۳۸ درصد میزان کاروتنوئید کاهش یافت (شکل ۸). نتایج حاضر نشان داد که کاهش کاروتنوئیدها تحت تنش خشکی همسو با کاهش کلروفیل‌های a و b بود. به نظر می‌رسد که تنش خشکی با افزایش آسیب اکسیداتیو و اختلال در عملکرد کلروپلاست‌ها موجب کاهش هم‌زمان رنگیزه‌های فتوسنتزی شده است و از آنجاکه کاروتنوئیدها نقش مهمی در حفاظت از کلروفیل‌ها در برابر آسیب اکسیداتیو دارند، کاهش آن‌ها می‌تواند با کاهش کلروفیل‌های a و b تحت شرایط تنش خشکی مرتبط باشد. تنش خشکی، فعالیت آنزیم‌های مسیر بیوسنتز کاروتنوئید مانند فیتوئن سنتاز و لایکوپن سیکلاز، را کاهش داده و منابع متابولیکی گیاه را به سمت سازوکارهای بقاء هدایت می‌کند (Shivalal et al., 2024). در دیگر مطالعات، کاهش محتوای کاروتنوئید تحت تنش خشکی در گیاه ماش نیز گزارش شده است (Jha et al., 2025).



شکل ۵- اثر برهم‌کنش تنش خشکی و رقم بر میزان کلروفیل b گیاه ماش

Figure 5- Interaction effect of drought stress and cultivar on chlorophyll b content in mung bean

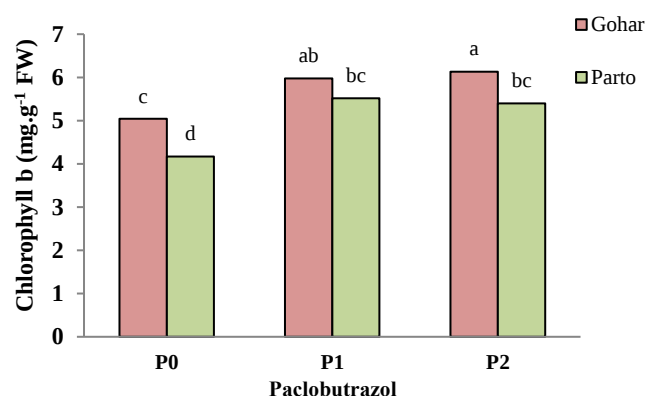
D1: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D2: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D3: 120 mm evaporation from the evaporation pan

D1: ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، D2: ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، D3: ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر

D1: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D2: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D3: 120 mm evaporation from the evaporation pan

رقم گوهر ۵ و ۲۸/۲ درصد میزان کلروفیل b کاهش یافت (شکل ۵). مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش پاکلوبوترازول و رقم نیز بیانگر این بود که در هر دو رقم ماش، محلول‌پاشی پاکلوبوترازول سبب افزایش میزان کلروفیل b شد و این افزایش در رقم گوهر نسبت به رقم پرتو بیشتر بود (شکل ۶). میزان کلروفیل b در محلول‌پاشی غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم محلول‌پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در رقم گوهر ۱۷/۷ درصد و در رقم پرتو ۲۲/۷ درصد افزایش یافت (شکل ۶). در همه سطوح تنش خشکی، محلول‌پاشی پاکلوبوترازول سبب افزایش میزان کلروفیل b شد. به‌طوری که در ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، محلول‌پاشی غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر نسبت به شاهد (عدم محلول‌پاشی) به‌ترتیب ۵/۵، ۴/۸ و ۴/۲۷ درصد کلروفیل b افزایش یافت (شکل ۷).

یافته‌های این مطالعه نشان داد که کاهش کلروفیل b همسو با کاهش کلروفیل a و محتوای نسبی آب برگ و افزایش نشت یونی بود. به نظر می‌رسد که کاهش وضعیت آبی گیاه و آسیب غشاهای سلولی، پایداری رنگیزه‌های فتوسنتزی را کاهش داده است. در مقابل، کاربرد پاکلوبوترازول با حفظ وضعیت آبی گیاه و کاهش نشت یونی، از تخریب کلروفیل‌های a و b جلوگیری کرد. پاکلوبوترازول با کاهش اثرات مخرب تنش خشکی باعث افزایش یا حفظ محتوای کلروفیل a و به‌ویژه کلروفیل b می‌شود که این امر به بهبود جذب نور در سیستم فتوسنتزی و افزایش کارایی فتوسنتز منجر می‌گردد، این اثر معمولاً به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تغییر در تعادل هورمونی



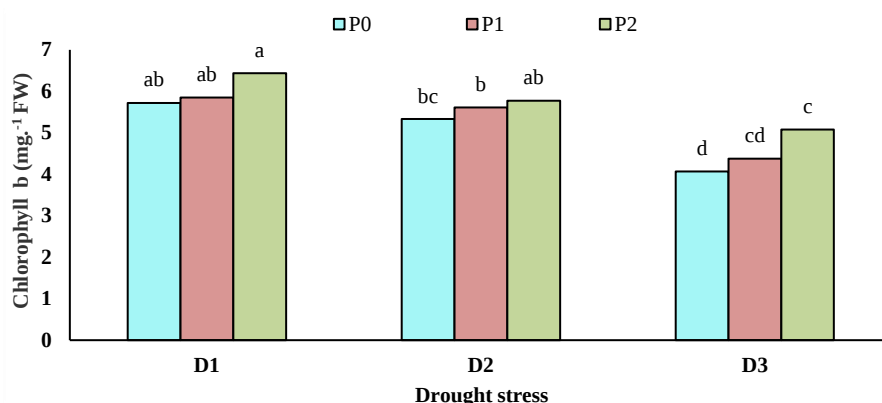
شکل ۶- اثر برهم‌کنش پاکلوبوترازول و رقم بر میزان کلروفیل b گیاه ماش

Figure 6- Interaction effect of paclobutrazol and cultivar on chlorophyll b content in mung bean

P0: عدم محلول‌پاشی پاکلوبوترازول، P1: ۳۰ میلی‌گرم در لیتر محلول‌پاشی

پاکلوبوترازول و P2: ۸۰ میلی‌گرم در لیتر محلول‌پاشی پاکلوبوترازول

P0: no paclobutrazol foliar application, P1: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P2: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application

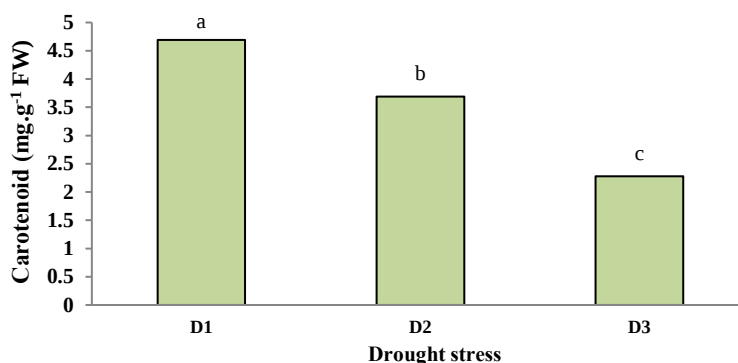


شکل ۷- اثر برهم کنش تنش خشکی و پاکلوبوترازول بر میزان کلروفیل b گیاه ماش

Figure 7- Interaction effect of drought stress and paclobutrazol on chlorophyll b content in mung bean

D1: ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D2: ۸۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D3: ۱۲۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، P0: عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول، P1: غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوبوترازول و P2: غلظت ۸۰ میلی گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوبوترازول

D1: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D2: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D3: 120 mm evaporation from the evaporation pan; P0: no paclobutrazol foliar application, P1: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P2: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application



شکل ۸- اثر ساده تنش خشکی بر میزان کاروتنوئید گیاه ماش

Figure 8- Simple effect of drought stress on carotenoid content in mung bean

D1: ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D2: ۸۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D3: ۱۲۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر

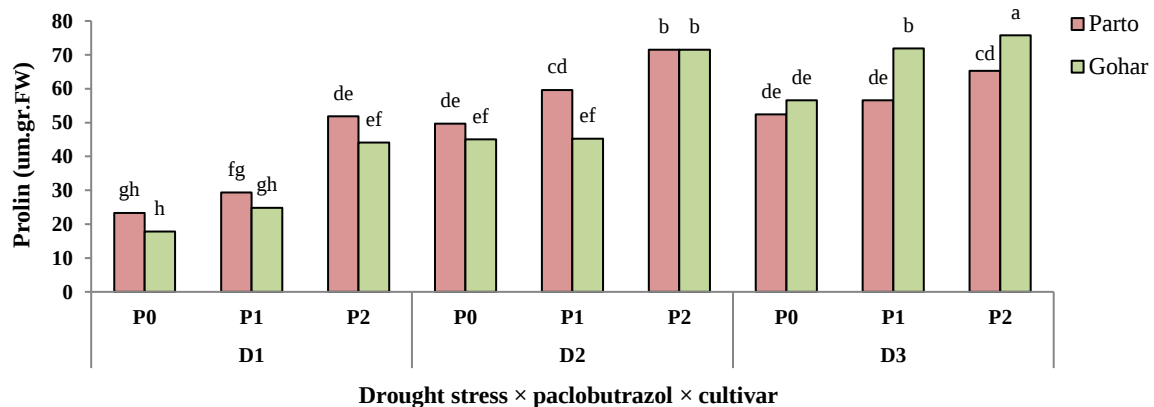
D1: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D2: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D3: 120 mm evaporation from the evaporation pan

پرویلین

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها مشخص کرد که میزان پرویلین به‌طور معنی‌داری ($P < 0.01$) تحت تأثیر برهم کنش سه‌گانه تیمارهای تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین برهم کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم نشان داد که در هر دو رقم پرتو و گوهر، تنش خشکی سبب افزایش میزان پرویلین شد و در همه سطوح تنش خشکی، محلول پاشی پاکلوبوترازول سبب افزایش بیشتر میزان پرویلین گردید (شکل ۸). در شرایط ۴۰ و ۸۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم گوهر و در شرایط ۱۲۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم پرتو میزان پرویلین بیشتری داشت. محلول پاشی غلظت ۸۰ میلی گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم

محلول پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در رقم گوهر در شرایط تنش خشکی شدید (۱۲۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر) ۱۹/۶۱ درصد و در شرایط ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر ۵۴/۹ درصد و در رقم پرتو به‌ترتیب ۲۵/۳ و ۵۹/۶ درصد میزان پرویلین افزایش یافت (شکل ۹). در این مطالعه، افزایش پرویلین تحت شرایط تنش خشکی همراه با افزایش قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بود، به نظر می‌رسد که پاکلوبوترازول با بهبود وضعیت آبی گیاه، حفظ پایداری غشاء و کاهش آسیب اکسیداتیو موجب فعال شدن بهتر سازوکارهای دفاعی گیاه و افزایش تجمع پرویلین شده است و افزایش پرویلین و قندهای محلول نیز از طریق تنظیم اسمزی، به حفظ آب سلول‌ها و افزایش تحمل گیاه ماش در برابر تنش خشکی کمک کرده است.

افزایش محتوای پرولین تحت تنش خشکی به‌عنوان یکی از سازوکارهای تنظیم اسمزی و مهم در سیستم آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی شناخته می‌شود که با حفاظت از غشاهای سلولی، پروتئین‌ها و آنزیم‌های سیتوپلاسمی، و همچنین کاهش و مهار گونه‌های فعال اکسیژن و رادیکال‌های آزاد، به افزایش تحمل گیاه کمک می‌کند (Sumitra et al., 2024). باباراشی و همکاران (Babarashi et al., 2021) گزارش کردند که در گیاه ماش، محلول‌پاشی پاکلوبوترازول با مهار سنتز جیبرلین و کاهش رشد طولی و بازتوزیع منابع متابولیکی، مسیرهای پاسخ به تنش را فعال می‌کند که این تغییرات باعث افزایش بیان آنزیم‌های مرتبط با سنتز پرولین شده و در نتیجه تجمع پرولین افزایش می‌یابد.



شکل ۹- اثر برهم‌کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم بر میزان پرولین گیاه ماش

Figure 9- Interaction effect of drought stress, paclobutrazol, and cultivar on proline content in mung bean

D1: ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، D2: ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، D3: ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، P0: عدم محلول‌پاشی پاکلوبوترازول، P1: غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر محلول‌پاشی پاکلوبوترازول و P2: غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر محلول‌پاشی پاکلوبوترازول
D1: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D2: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D3: 120 mm evaporation from the evaporation pan; P0: no paclobutrazol foliar application, P1: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P2: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application

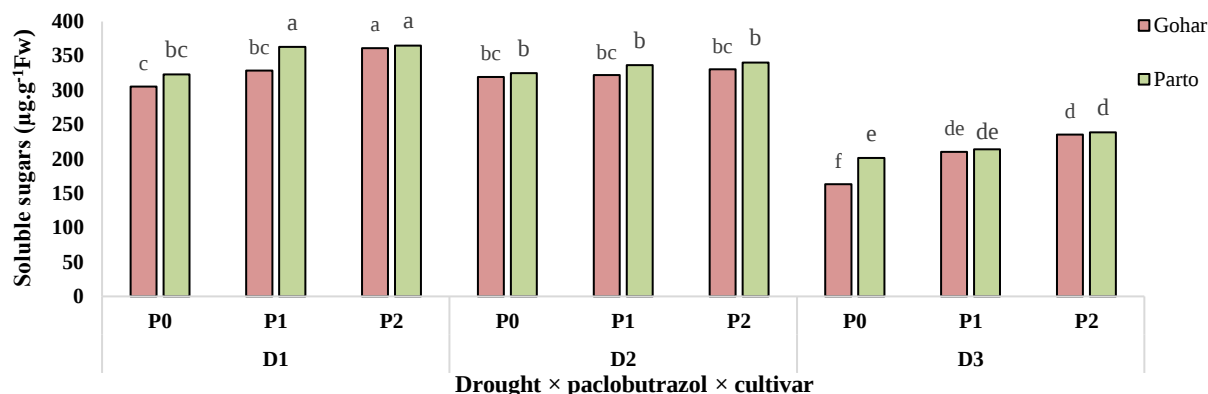
به نظر می‌رسد که افزایش قندهای محلول تحت شرایط تنش، در کنار کاهش محتوای نسبی آب برگ نشان‌دهنده نقش قندهای محلول به‌عنوان اسمولیت‌های سازگارکننده در تنظیم اسمزی و کمک به حفظ وضعیت آبی سلول‌ها است. همچنین افزایش قندهای محلول در تیمار پاکلوبوترازول همراه با کاهش نشت یونی و حفظ بیشتر رنگیزه‌های فتوسنتزی بود که نشان می‌دهد پاکلوبوترازول با کاهش اثرات نامطلوب تنش، شرایط مناسب‌تری برای تجمع قندهای محلول فراهم کرده است.

پاکلوبوترازول با کاهش رشد رویشی باعث تغییر در تخصیص کربن به سمت ترکیبات سازگار با تنش می‌شود، در شرایط خشکی، این تغییر متابولیکی منجر به افزایش تجمع قندهای محلول در برگ می‌گردد که به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های اسمزی عمل کرده و در حفظ تورژسانس سلولی و پایداری غشاء نقش دارند و در نتیجه تحمل به خشکی را بهبود می‌بخشند (Babarashi et al., 2021). در گندم نیز محلول‌پاشی پاکلوبوترازول تحت تنش خشکی سبب افزایش قندهای محلول برگ شد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد (Dwivedi & Kumar, 2016).

قندهای محلول

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش سه‌گانه بین تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم بر میزان قندهای محلول در سطح احتمال $p \leq 0.05$ معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم نشان داد که میزان قندهای محلول در هر دو رقم پرتو و گوهر در همه سطوح تنش خشکی و محلول‌پاشی پاکلوبوترازول افزایش یافت (شکل ۱۰). در همه سطوح تنش خشکی، میزان قند محلول رقم پرتو بیشتر بود. محلول‌پاشی غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم محلول‌پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در رقم گوهر در شرایط تنش خشکی شدید (۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) ۳۰/۷ درصد و در شرایط ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر ۱۵/۴۵ درصد و در رقم پرتو به‌ترتیب ۱۴/۳۹ و ۱۱/۴۷ درصد میزان قندهای محلول افزایش یافت (شکل ۱۰).

طبق نتایج حاصل از این پژوهش، میزان قندهای محلول همانند پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در پاسخ به تنش خشکی افزایش یافت و محلول‌پاشی پاکلوبوترازول این افزایش را تقویت کرد.



شکل ۱۰- اثر برهم کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم بر میزان قندهای محلول برگ گیاه ماش

Figure 10- Interaction effect of drought stress, paclobutrazol, and cultivar on soluble sugars content in mung bean

D1: 40 میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D2: 80 میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر، D3: 120 میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر؛ P0: عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول، P1: 30 mg.L⁻¹ غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوبوترازول و P2: 80 mg.L⁻¹ غلظت ۸۰ میلی گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوبوترازول.

D1: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D2: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D3: 120 mm evaporation from the evaporation pan; P0: no paclobutrazol foliar application, P1: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P2: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application

کاتالاز

میزان کاتالاز به طور معنی داری ($P < 0.01$) تحت تأثیر برهم کنش سه گلنه تیمارهای تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین برهم کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم نشان داد که در هر دو رقم پرتو و گوهر در همه سطوح تنش خشکی و محلول پاشی پاکلوبوترازول، میزان کاتالاز افزایش یافت (شکل ۱۱). در شرایط ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم گوهر میزان کاتالاز بیشتری داشت. محلول پاشی غلظت ۸۰ میلی گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در رقم گوهر و شرایط تنش خشکی شدید (۱۲۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر) ۲۰ درصد و در شرایط ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر پنج درصد و در رقم پرتو به ترتیب ۵ و ۱۱ درصد میزان آنزیم کاتالاز افزایش یافت (شکل ۱۱). طبق نتایج حاصل شده، افزایش فعالیت کاتالاز تحت شرایط تنش خشکی همراه با افزایش پرولین و قندهای محلول، بیانگر فعال شدن همزمان سازوکارهای دفاعی و تنظیم اسمزی گیاه در پاسخ به کمبود آب است، به نظر می رسد که محلول پاشی پاکلوبوترازول با بهبود وضعیت آبی گیاه از طریق افزایش محتوای نسبی آب برگ، کاهش آسیب غشایی از طریق کاهش نشت یونی و حفظ بیشتر رنگیزه های فتوسنتزی، شرایط مناسبی را برای تقویت سیستم آنتی اکسیدانی و افزایش فعالیت کاتالاز فراهم کرده است.

افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی تحت تنش خشکی نشان دهنده فعال شدن سازوکار دفاعی گیاه برای حذف گونه های فعال

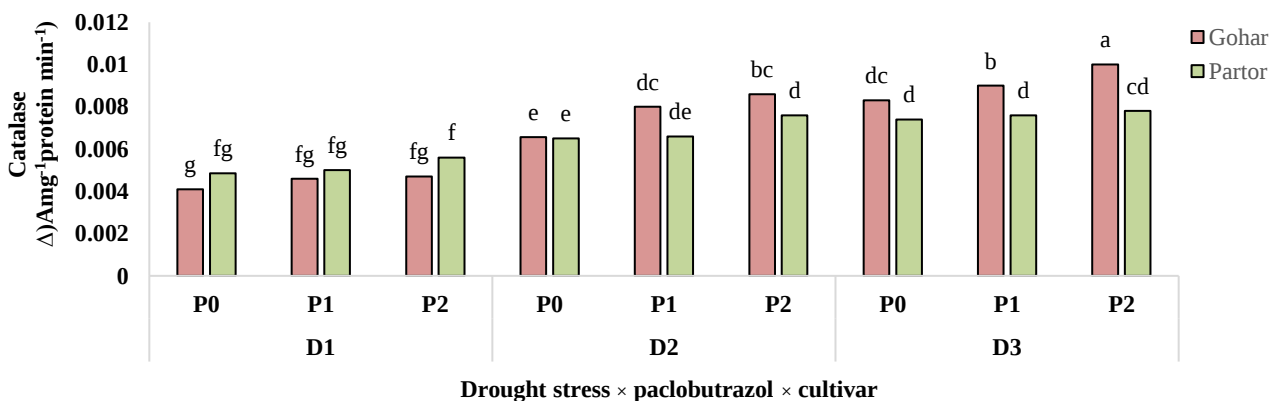
اکسیژن است (Wu & Yang, 2024). افزایش فعالیت این آنزیم ها و کاهش خسارات ناشی از تنش خشکی در گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) (Chavoushi et al., 2019) نیز گزارش شده است. پاکلوبوترازول در شرایط خشکی با تعدیل وضعیت اکسید-احیاء و کاهش آسیب فتوسیستم ها موجب ایجاد سیگنال های اکسیداتیو کنترل شده و تقویت سیستم حذف رادیکال های آزاد اکسیژن می شود. در نتیجه فعالیت کاتالاز برای تجزیه پراکسید هیدروژن افزایش یافته و تعادل اکسیداتیو سلول حفظ می گردد (Yadav & Hemantaranjan, 2017).

آسکوربات پراکسیداز

اثر برهم کنش سه گانه تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم در سطح احتمال $P < 0.01$ تأثیر معنی داری بر میزان آسکوربات پراکسیداز گیاه ماش داشت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین برهم کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم نشان داد که میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز در هر دو رقم پرتو و گوهر در همه سطوح تنش خشکی و محلول پاشی پاکلوبوترازول افزایش یافت. اما در شرایط ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم پرتو و در شرایط ۸۰ و ۱۲۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم گوهر میزان آسکوربات پراکسیداز بیشتری داشت. محلول پاشی غلظت ۸۰ میلی گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در رقم پرتو و شرایط تنش خشکی شدید (۱۲۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر) ۳۶ درصد و در شرایط ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر ۳۸/۸ درصد و در رقم گوهر به ترتیب ۳۰/۳ و ۴۷/۶۴ درصد میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز افزایش یافت

پاکلوبوترازول تحت تنش خشکی با افزایش کارایی سیستم آنتی‌اکسیدانی و مهار تولید گونه‌های فعال اکسیژن در کلروپلاست موجب فعال‌سازی چرخه آسکوربات-گلوتاتیون می‌شود، در این مسیر، برای حذف مؤثر پراکسید هیدروژن، فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز افزایش می‌یابد تا از تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن و آسیب اکسیداتیو به ساختارهای سلولی جلوگیری شود (Abbasi et al., 2015).

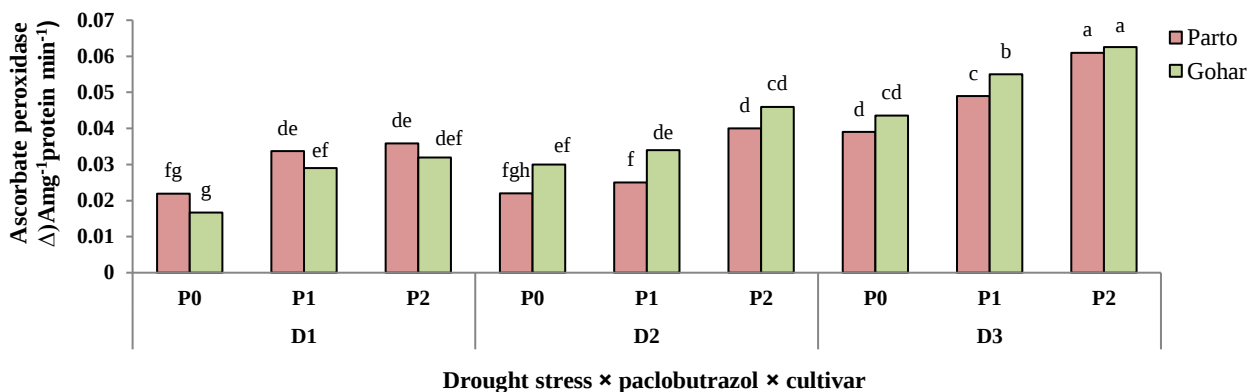
(شکل ۱۲). به نظر می‌رسد که افزایش تجمع ترکیبات اسمزی مانند پرولین و قندهای محلول، با حفظ وضعیت آب سلول، از شدت آسیب‌های ناشی از تنش کاسته و در کنار فعال شدن آسکوربات پراکسیداز، به حفظ پایداری غشاء و کاهش نشت یونی کمک کرده است. همچنین آنچه مشخص است، این است که محلول‌پاشی پاکلوبوترازول با بهبود محتوای نسبی آب برگ و کاهش نشت یونی، شرایط مناسب‌تری را برای عملکرد مؤثر سیستم آنتی‌اکسیدانی و افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز در گیاه ماش تحت تنش خشکی فراهم کرده است.



شکل ۱۱- اثر برهم‌کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم بر میزان آنزیم کاتالاز گیاه ماش

Figure 11- Interaction effect of drought stress, paclobutrazol, and cultivar on catalase enzyme activity in mung bean

D1: 40 mm evaporation from the evaporation pan; D2: 80 mm evaporation from the evaporation pan; D3: 120 mm evaporation from the evaporation pan; P0: no paclobutrazol foliar application, P1: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P2: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application



شکل ۱۲- اثر برهم‌کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم بر میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز گیاه ماش

Figure 12- Interaction effect of drought stress, paclobutrazol, and cultivar on ascorbate peroxidase enzyme activity in mung bean

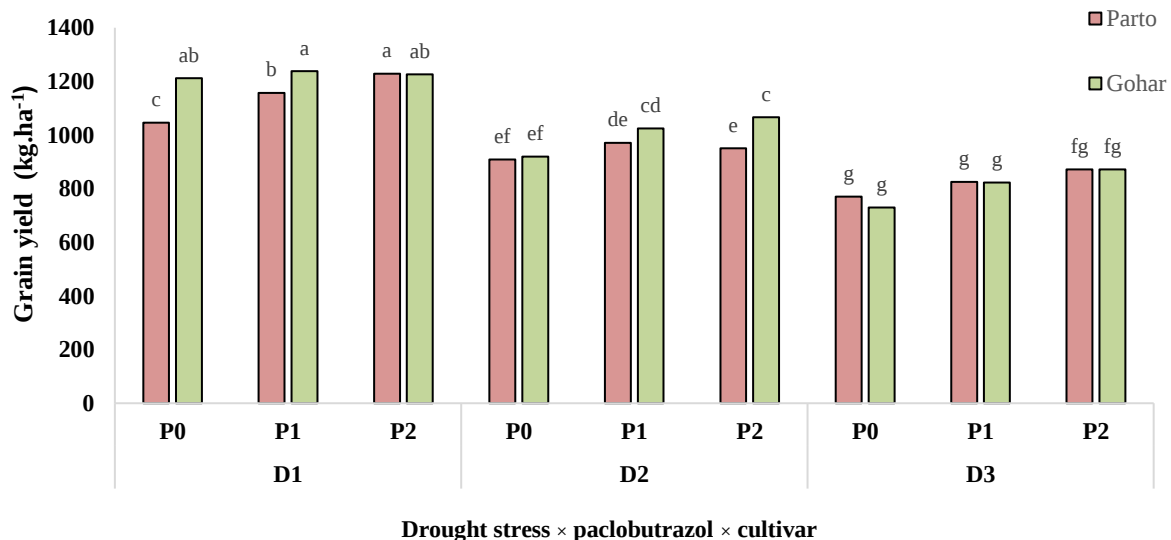
D1: 40 mm evaporation from the evaporation pan; D2: 80 mm evaporation from the evaporation pan; D3: 120 mm evaporation from the evaporation pan; P0: no paclobutrazol foliar application, P1: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P2: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application

عملکرد دانه

با توجه به جدول تجزیه واریانس داده‌ها، اثر برهم‌کنش سه‌گانه تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم بر میزان عملکرد دانه در سطح احتمال $p \leq 0.05$ معنی‌دار بود (جدول ۳). با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سه‌گانه تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم در هر دو رقم ماش، با افزایش شدت تنش خشکی میزان عملکرد دانه کاهش یافت، به‌نحوی که بیشترین میزان در سطح ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر حاصل شد. اما تیمار پاکلوبوترازول در همه سطوح تنش خشکی سبب اثر مثبت و افزایشی در عملکرد دانه شد (شکل ۱۳). در شرایط ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم گوهر عملکرد دانه بیشتری داشت، اما در شرایط ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر رقم پرتو عملکرد دانه بیشتری حاصل شد؛ به‌نحوی که در محلول پاشی غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر پاکلوبوترازول نسبت به عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول (شاهد) در رقم گوهر در شرایط ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر ۳۰/۷۵ درصد و در شرایط ۴۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر ۱۱/۱۸ درصد و در رقم پرتو به‌ترتیب ۲۳/۸۶ و ۴/۱ درصد میزان عملکرد دانه ماش افزایش یافت (شکل ۱۳). کاهش عملکرد دانه تحت شرایط تنش خشکی با کاهش محتوای نسبی آب برگ، کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش نشت یونی همراه بود.

به نظر می‌رسد که افزایش پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش، با کاهش اثرات نامطلوب کمبود آب، به حفظ عملکرد گیاه کمک کرده است. همچنین محلول پاشی پاکلوبوترازول با بهبود صفات فیزیولوژیکی مذکور، شرایط مناسب‌تری برای افزایش عملکرد دانه فراهم کرد.

تنش خشکی با کاهش هدایت روزنه‌ای و ظرفیت فتوسنتزی موجب کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه می‌شود، همچنین اختلال در فعالیت آنزیم‌ها و تسریع پیری برگ، دوره پُر شدن دانه را کاهش داده و در نهایت باعث اُفت تعداد و وزن دانه می‌گردد (Sehgal et al., 2018). پاکلوبوترازول با مهار بیوسنتز جیبرلین‌ها، رشد رویشی را کاهش داده و سبب تخصیص بیشتر مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی می‌شود، همچنین با افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی، حفظ پایداری غشاء و بهبود تنظیم اسمزی، ظرفیت فتوسنتزی گیاه تحت تنش خشکی حفظ شده و در نهایت وزن دانه افزایش می‌یابد (Magtalas et al., 2020). در همین راستا، در برنج (*Oryza sativa* L.) (Nuraziza et al., 2025) و ذرت (*Zea mays* L.) (Kamran et al., 2020) نیز گزارش شد که کاربرد پاکلوبوترازول تحت تنش خشکی موجب بهبود صفات فیزیولوژیک و افزایش عملکرد دانه شد.



شکل ۱۳- اثر برهم‌کنش تنش خشکی، پاکلوبوترازول و رقم بر میزان عملکرد دانه گیاه ماش

Figure 13- Interaction effect of drought stress, paclobutrazol, and cultivar on grain yield activity in mung bean

D1: ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، D2: ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، D3: ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر، P0: عدم محلول پاشی پاکلوبوترازول، P1: غلظت ۳۰ میلی

میلی گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوبوترازول و P2: غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر محلول پاشی پاکلوبوترازول

D1: 40 mm evaporation from the evaporation pan, D2: 80 mm evaporation from the evaporation pan, D3: 120 mm evaporation from the evaporation pan; P0: no paclobutrazol foliar application, P1: 30 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application, P2: 80 mg.L⁻¹ paclobutrazol foliar application

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی اثرات نامطلوب و معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه ماش داشت، به‌طوری که با افزایش شدت تنش، محتوای نسبی آب برگ، رنگیزه‌های فتوسنتزی و پایداری غشاهای سلولی کاهش یافت. با این حال، محلول‌پاشی پاکلوبوترازول با بهبود وضعیت آبی گیاه، حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی، افزایش تجمع ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، توانست آثار زیان‌بار ناشی از تنش خشکی را تا حد زیادی کاهش دهد. افزایش محتوای نسبی آب برگ، پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمار شده با پاکلوبوترازول بیانگر نقش مؤثر این تنظیم‌کننده رشد در افزایش تحمل گیاه ماش به شرایط کم‌آبی است. محلول‌پاشی

پاکلوبوترازول، به‌ویژه در غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر، در تمامی سطوح تنش خشکی موجب بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه شد. مقایسه ارقام مورد بررسی نیز بیانگر آن بود که رقم گوهر در شرایط آبیاری مطلوب و تنش‌های خفیف تا متوسط، از نظر اکثر صفات فیزیولوژیکی عملکرد مطلوب‌تری داشت، در حالی که رقم پرتو در شرایط تنش شدید خشکی با حفظ بهتر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و فعال‌سازی مؤثرتر سازوکارهای دفاعی، تحمل بیشتری به خشکی نشان داد. با این وجود، ارزیابی کلی صفات مورد مطالعه و عملکرد نهایی گیاه نشان داد که رقم گوهر از برتری بیشتری برخوردار است. بنابراین، کاربرد پاکلوبوترازول به‌ویژه در غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود وضعیت فیزیولوژیکی، افزایش تحمل به خشکی و ارتقای عملکرد گیاه ماش، به‌خصوص در رقم گوهر، توصیه شود.

References

- Abbasi, A., Shekari, F., & Mustafavi, S. H. (2015). Effect of paclobutrazol and salicylic acid on antioxidant enzyme activity in drought stress in wheat. *Idesia (Arica)*, 33(4), 5–13. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292015000400002>
- Abd El-Gawad, H. G., Mukherjee, S., Farag, R., Abd Elbar, O. H., Hikal, M., Abou El-Yazied, A., Abd Elhady, S. A., Helal, N., ElKelish, A., El Nahhas, N., Azab, E., Ismail, I. A., Mbarki, S., & Ibrahim, M. F. M. (2021). Exogenous γ -aminobutyric acid (GABA)-induced signaling events and field performance associated with mitigation of drought stress in *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Signaling & Behavior*, 16(2), 1851490. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1853384>
- Abid, G., Sassi, K., Debode, F., Dubois, B., Nefissi Ouertani, R., Abdelkrim, S., Ghouili, E., Gao, Y., Li, Z., Jebara, S. H., Jebara, M., & Muhovski, Y. (2025). Comprehensive physiological and transcriptomic insights into drought stress responses in faba bean (*Vicia faba* L.). *BMC Plant Biology*, 25, 1604. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07670-9>
- Ahmadi, M., Zare, M. J., & Emam, Y. (2019). Study of quantitative and qualitative traits of bread wheat by using of cycocel, zinc sulfate and bio-fertilizer application under dry land farming. *Plant Ecophysiology (Arsanjan Branch)*, 11(38), 148-161. (In Persian)
- Alghabari, F. M. (2026) Elucidation of drought tolerance mechanisms of different mungbean genotypes based upon physiological, biochemical and genetic mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 17, 1710212. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1710212>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, 300, 6541.
- Aria, P. (1997). Description of Methods of Physical Decomposition of Soil. Tehran Soil and Water Research Institute Publications. 65 p.
- Babarashi, E., Rokhzadi, A., Pasari, B., & Mohammadi, K. (2021). Ameliorating effects of exogenous paclobutrazol and putrescine on mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] under water deficit stress. *Plant, Soil and Environment*, 67(1), 40–45. <https://doi.org/10.17221/437/2020-PSE>
- Bañón D, Ortuño, M. F., Sánchez-Blanco, M. J., Pagán, B. L., & Bañón S. (2023). effects of Paclobutrazol and mepiquat chloride on the physiological, nutritional, and morphological behavior of potted icterina sage under greenhouse conditions. *Agronomy*, 13(8), 2161. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082161>
- Bates, L. S., Waldern, R. P., & Tear, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39, 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Bucks, D. A., Nakayama, F. S., & Warrick, A. W. (1982). Principles, practices, and potentialities of trickle drip irrigation. In D. Hillel (Ed.). *Advances in Irrigation Agronomy Assets Cambridge*, 1, 219–298. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-024301-3.50013-7>
- Cao, Y., Yang, W., Ma, J., Cheng, Z., Zhang, X., Liu, X., & Wu, X. (2024). An integrated framework for drought stress in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(17), 9347. <https://doi.org/10.3390/ijms25179347>

- Chavoushi, M., Najafi, F., Salimi, A., & Angaji, S. A. (2019). Improvement in drought stress tolerance of safflower during vegetative growth by exogenous application of salicylic acid and sodium nitroprusside. *Industrial Crops and Products*, 134, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.071>
- Desta, B., & Amare, G. (2021). Paclobutrazol as a plant growth regulator. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8, 1. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00199-z>
- Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P., & Thorpe, T. A. (1981). Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, 32, 93–101. <https://doi.org/10.1093/jxb/32.1.93>
- Diaz-Perez, J. C., Shackel, K. A., & Sutter, E. G. (2006). Relative water content. *Annals of Botany*, 97, 85–96.
- Dwivedi, S. K., Arora, A., & Kumar, S. (2017). Paclobutrazol-induced alleviation of water-deficit damage in relation to photosynthetic characteristics and expression of stress markers in contrasting wheat genotypes. *Photosynthetica*, 55(2), 351–359. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0652-5>
- Dwivedi, S. K., & Kumar, S. (2016). Retracted article: Effect of paclobutrazol on photosynthesis and expression of pyrroline-5-carboxylate synthase in contrasting wheat genotypes under water deficit stress condition. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 22(3), 425. <https://doi.org/10.1007/s12298-016-0343-5>
- Eesha, A., Kulshrestha, M., Choudhary, P., Kumar, A., & Nag, A. K. (2024). Metabolic and enzymatic evaluation of lentil (*Lens culinaris* Medik.) seedlings under drought stress. *Indian Journal of Agricultural Research*, 58(1), 43–48. <https://doi.org/10.18805/IJARE.A-5884>
- Flinet, H. I., Boyce, B. R., & Beatti, D. J. (1966). Index of injury drought a useful expression of freezing injury to plant tissues as determined by the electrolytic method. *Canadian Journal of Plant Science*, 47, 229–230. <https://doi.org/10.4141/cjps67-043>
- Heidari, H., Alizadeh, Y., & Fazeli, A. (2019). Effects of seed priming and foliar application of salicylic acid on some of physiological characteristic and yield on mung bean (*vigna radiata* L.) under drought stress condition. *Journal of Plant Production (Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 26(2), 127-141. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jopp.2019.14863.2327>
- Irigoyen, J. J., Einerich, D. W., & Sanchez-Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, 84, 55–60. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>
- Jha, U. C., Shafi, S., Tallury, S., Nayyar, H., Ciampitti, I., Siddique, K., & Prasad, P. V. (2025). Differential physiological and yield responses of selected mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) genotypes to various high-temperature stress regimes. *Scientific Reports*, 15, 1034. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84615-6>
- Jothimani, K., & Arulbalachandran, D. (2020). Physiological and biochemical studies of black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper) under polyethylene glycol induced drought stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29, 101777. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101777>
- Kamran, M., Ahmad, S., Ahmad, I., Hussain, I., Meng, X., Zhang, X., Javed, T., Ullah, M., Ding, R., Xu, P., Gu, W., & Han, Q. (2020). Paclobutrazol application favors yield improvement of maize under semiarid regions by delaying leaf senescence and regulating photosynthetic capacity and antioxidant system during grain-filling stage. *Agronomy*, 10(2), 187. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020187>
- Khan, A. A., Wang, Y. F., Akbar, R., & Alhoqail, W. A. (2025). Mechanistic insights and future perspectives of drought stress management in staple crops. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1547452>
- Klute, A. (Ed.) (1986). *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed.). Madison, W. I. (1974). *Proceedings - Soil Science Society of America. Soil Science Society of America*, 38(1-3). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed>
- Lichtenthaler, H. K., & Wellburn, A. R. (1983). Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extract in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
- Magtalas, M. P., Vizmonte, P. T., & Agustin, A. M. L. (2020). Promoting effects of paclobutrazol on the productivity of different rice (*Oryza sativa* L.) ecotypes under rainfed lowland condition. *Mining Science and Technology*, 18(2), 157–173. <https://doi.org/10.61310/mndjstea.0950.20>
- Maheshwari, C., Singh, P., Kumar, R., & Sharma, S. (2024). Ameliorative effects of paclobutrazol in rice under water deficit stress. *Rice Science*, 31(5), 603–616. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2024.03.004>
- Nakano, Y., & Asada, K. (1987). Purification of ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts; its inactivation in ascorbate-depleted medium and reactivation by monodehydroascorbate radical. *Plant and Cell Physiology*, 28(1), 131-140. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a077268>

- Nuraziza, S., Rahayu, M., & Purwanto, E. (2025). Physiological effects and yield of Mentik Wangi rice under drought stress with paclobutrazol application. *Annals of Biology*, 41(1), 77–85.
- Pal, S., Roychoudhury, A., & Chakraborty, N. (2016). Paclobutrazol induces tolerance in tomato to deficit irrigation through diversified effects on plant morphology, physiology and metabolism. *Scientific Reports*, 6, 39321. <https://doi.org/10.1038/srep39321>
- Panda, S., Mondal, S., Hembram, S., Atta, K., & Ali, O. (2023). Effect of paclobutrazol on vegetative and reproductive phenology of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Biological Forum – An International Journal*, 15(4), 609–612.
- Peterson, R. G., & Calvin, L. D. (1996). Sampling. In D. L. Sparks (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical Methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
- Richards, L. A. (1948). Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*, 66(2), 105–110.
- Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K. H. M., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R. K., Hanumantha Rao, B., Nair, R. M., Prasad, P. V. V., & Nayyar, H. (2018). Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: Impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1705. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Sharifa, S., & Abu-Muriefah, S. S. (2015). Effects of paclobutrazol on growth and physiological attributes of soybean (*Glycine max*) plants grown under water stress conditions. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 2(7), 81–93.
- Shivalal, N., Mukti Ram, P., Binod, P., Anjali, D., Harikala, P., & Radhakrishna, B. (2024). Drought stress effect, tolerance, and management in wheat – a review. *Cogent Food and Agriculture*, 10(1), 2296094. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2296094>
- Sofy, M. R., Elhindi, K. M., Farouk, S., & Alotaibi, M. A. (2020). Zinc and paclobutrazol mediated regulation of growth, upregulating antioxidant aptitude and plant productivity of pea plants under salinity. *Plants*, 9(9), 1197. <https://doi.org/10.3390/plants9091197>
- Soumya, P. R., & Kumar, P. (2017). Optimization of paclobutrazol dose for foliar and drenching applications under water deficit stress in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 8(4), 566–573.
- Sumitra, P., Benjamin, K., Hakan, O., Frederike, Z., & Michael, F. (2024). Physiological and biochemical changes induced by drought stress during the stem elongation and anthesis stages in the *Triticum* genus. *Environmental and Experimental Botany*, 228, 106047. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.106047>
- Vessal, S., Arefian, M., & Siddique, K. H. M. (2020). Proteomic responses to progressive dehydration stress in leaves of chickpea seedlings. *BMC Genomics*, 21, 523. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-06930-2>
- Wu, H., & Yang, Z. (2024). Effects of drought stress and post-drought rewatering on winter wheat: A meta-analysis. *Agronomy*, 14(2), 298. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020298>
- Yadav, D. K., & Hemantaranjan, A. (2017). Mitigating effects of paclobutrazol on flooding stress damage by shifting biochemical and antioxidant defense mechanisms in mungbean (*Vigna radiata* L.). *Legume Research*, 40(3), 453–461. <https://doi.org/10.18805/lr.v0i0.7593>